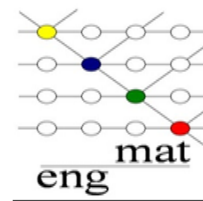




UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS



TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**Levantamento teórico do efeito da adição de materiais pozolânicos em
sistemas de pastas de cimento para poços de petróleo**

Angel Roberta Oliveira de Sousa

Engenharia de Materiais / Centro de tecnologia

Orientador(a): **Profa. Dra. Carina Gabriela de Melo e Melo**

Departamento de Engenharia de Materiais / Centro de Tecnologia

João Pessoa

2018

Catálogo na publicação
Seção de catalogação e Classificação

S7251 Sousa, Angel Roberta Oliveira de

Levantamento teórico do efeito da adição de materiais pozolânicos em sistemas de pastas de cimento para poços de petróleo. / Angel Roberta Oliveira de Sousa. – João Pessoa, 2018.
53 f.

Orientação: Prof^a. Dr^a. Carina Gabriela de Melo e Melo
Monografia (Graduação) – UFPB / Centro de Tecno.

1. Materiais pozolânicos 2. Cinza da folha de bananeira 3. Índice de atividade pozolânica I. Título.

UFPB/BC

ANGEL ROBERTA OLIVEIRA DE SOUSA

**Levantamento teórico do efeito da adição de materiais pozolânicos em
sistemas de pastas de cimento para poços de petróleo**

Trabalho de conclusão de curso
apresentado à coordenação de
Engenharia de Materiais, do Centro de
Tecnologia da Universidade Federal da
Paraíba, para apreciação da banca
examinadora como parte dos requisitos
para a obtenção do grau de bacharel em
Engenharia de Materiais.

Orientadora: Profa. Dra. Carina Gabriela de Melo e Melo

João Pessoa – PB

2018

Angel Roberta Oliveira de Sousa

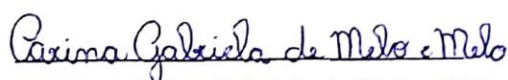
**Levantamento teórico do efeito da adição de materiais pozolânicos
em
sistemas de pastas de cimento para poços de petróleo**

Data de defesa: 11 de junho de 2018.

Período: 17.2

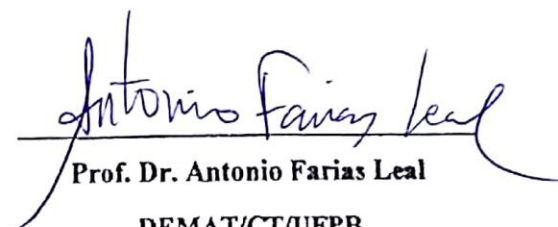
Resultado: Aprovado

Banca Examinadora:



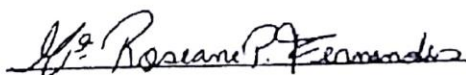
Profa. Dra. Carina Gabriela de Melo e Melo

DEMAT/CT/UFPB



Prof. Dr. Antonio Farias Leal

DEMAT/CT/UFPB



Profa. Dra. Maria Roseane de Pontes Fernandes

DEMAT/CT/UFPB

“Nada é impossível de mudar.

Desconfiai do mais trivial, na aparência singelo.

E examinai, sobretudo, o que parece habitual.

Suplicamos expressamente: não aceiteis o que é de hábito como coisa natural, pois em tempo de desordem sangrenta, de confusão organizada, de arbitrariedade consciente, de humanidade desumanizada, nada deve parecer natural, nada deve parecer impossível de mudar.”

Bertolt Brecht

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, José Roberto e Mariza Oliveira, e aos meus irmãos, Ânderson e Alessandra Sousa, pelos puxões de orelha, pelo colo e pelo incentivo. Obrigada por acreditarem em mim mesmo quando eu não acreditei.

*De todo o amor que recebi e recebo, saibam que os amo em dobro.
A vocês dedico este trabalho.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus pela vida e por sua presença diuturnamente durante toda a minha trajetória. Agradeço por Ele ter colocado em meu caminho pessoas tão maravilhosas, desde o berço.

Minha sincera gratidão pelos meus pais, José Roberto e Mariza Oliveira, e meus irmãos, Alessandra e Ânderson Sousa. Obrigada pelo suporte, pelo carinho e pela lição de perseverança. Obrigada por termos passado juntos pelas incontáveis dificuldades. Vocês são meu orgulho e, principalmente, minha inspiração na busca pela minha independência e meu lugar no mundo. Prometo que irei conseguir.

Agradeço a todo o corpo docente do DEMAT e em especial a três professores. À professora Carina Gabriela, que acompanhou e orientou este trabalho, oferecendo a mim uma oportunidade de expansão e aprofundamento de conhecimentos. Ao professor Daniel Macedo, minha eterna gratidão por ter me acolhido e inserido no ramo de pesquisa, despertando o desejo de pesquisar, descobrir, conhecer e aplicar o conhecimento adquirido a fim de contribuir para o avanço científico e melhoria da nossa qualidade de vida. À professora Lizzandra Fernanda meu muito obrigada, de verdade, pelo apoio que recebi desde o terceiro período, pelo carinho e por tudo, tudo mesmo!

Gratidão a vocês que fazem de nós o quarteto mais lindo, maravilhoso e quentinho dessa universidade. Obrigada, gente, vocês são demais! Raquel, Natan e Carol, o que o Sentate Perro uniu, a vida é incapaz de separar. Raquel, desde o primeiro dia você é um pontinho de luz na minha caminhada. Obrigada por ter sempre estado ao meu lado.

Kaio Alexandre, muito obrigada por ter se tornado meu amigo mesmo quando eu era tão tímida! Você foi a pessoa que me apresentou a Allan Jedson e fez surgir a amizade e a parceria que se perpetuou durante o curso através das inúmeras conversas, dos conselhos, das sínteses e da vida. Obrigada, meus doutorandos mais inteligentes e gentis.

Caio Matheus, a você agradeço pelo carinho e cuidado que sempre teve comigo, pelas piadas, pelas conversas, pelos vídeos que eu nunca vi (desculpa), pelas saídas (inclusive pelos seus comentários de quem nunca gosta do filme) e pela ponte de macarrão, que a gente arrasou (risos nervosos). Isso se estende a Artur de Moraes, a aura negra mais gentil que passou no curso. Artur, você é gentil, aceite, não há mal nenhum nisso.

Obrigada também a você, Clenimar Filemon, que em meus momentos de desespero durante a graduação me fez lembrar que o mundo é imenso, cheio de lhamas, cachorros e cabras bebês, e por esse mundo vale a pena demais viver.

A você, Arthur Pinheiro, meus mais sinceros votos de gratidão. Obrigada pelo amigo sincero, pelo companheiro por vezes duro, pelas playlists, pelos cuidados e pelas mais variadas formas que você encontrou de dizer “Eu te amo”. Obrigada por dividir comigo esse final de curso, obrigada por dividir comigo meus fardos e meu riso, obrigada por ser o motivo dele tantas vezes.

Obrigada a todos aqueles que fizeram parte da minha jornada! Levarei todos comigo sempre.

RESUMO

A dificuldade da exploração das jazidas do Pré-Sal fez surgir a necessidade de elaborar novos materiais capazes de resistir às intempéries e às condições ambientais intrínsecas dessa região de produção. Essa bacia petrolífera encontra-se em ambiente marítimo e é dominada por estruturas salinas provenientes da evaporação do mar, estruturas que podem ocasionar aprisionamento a broca devido à instabilidade do poço. Buscando suprir as necessidades advindas das condições de operação, utiliza-se cimento Portland para isolar e suportar os tubos de revestimento, dificultando, ou até mesmo impedindo, a vazão indesejável dos fluidos, além de oferecer suporte para melhorar a estabilidade. Desta forma, foi feito um levantamento teórico de caráter elucidativo acerca da cimentação de poços de petróleo e dos materiais pozolânicos utilizados pela indústria cimentícia, na tentativa de selecionar a melhor opção de pozolana proveniente de um resíduo vegetal para ser estudada, sendo esta capaz de promover um aumento considerável das propriedades mecânicas do cimento através da reação pozolânica. O resultado do presente trabalho foi satisfatório, visto que foi possível constatar um índice de atividade pozolânica bastante relevante da cinza da folha de bananeira; a qual também apresenta bons resultados de resistência à compressão de acordo com a literatura, além de ser uma opção ecologicamente viável, pois sua utilização provoca a diminuição do consumo de cimento e aumenta o reaproveitamento de resíduos.

ABSTRACT

The difficulty of exploring the pre-salt deposits has led to the need to make new materials capable of withstanding the inclement weather and the intrinsic environmental conditions of this region of production. This oil basin is in a marine environment and is dominated by saline structures from the evaporation of the sea, structures that can cause imprisonment of the drill due to the instability of the well. In order to meet the needs of operating conditions, Portland cement is used to insulate and support the coating tubes, making it difficult or even preventing the undesirable flow of fluids, as well as providing support to improve stability. In this way, a theoretical survey of the clarification of the oil wells and the pozzolanic materials used by the cement industry was done, in an attempt to select the best pozzolan option from a vegetal residue to be studied, being able to promote a considerable increase of the mechanical properties of the cement through the pozzolanic reaction. The result of the present work was satisfactory, since it was possible to verify a very relevant pozzolanic activity index of the banana leaf ash; which also presents good results of compressive strength according to the literature, besides being an ecologically viable option, as its use causes a decrease in the consumption of cement and increases the reuse of waste.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Morfologia do Silicato Dicálcico	23
Figura 2. Fluxograma referente às transformações polimórficas da Belita	24
Figura 3. Estrutura cristalina do (a) C_2S de acordo com MUMME, 1995 apud MELO, 2012 e (b) C_2S hexagonal	24
Figura 4. Cimentação primária	31
Figura 5. Sequência de uma cimentação primária	32
Figura 6. Poço com falha de cimentação	33
Figura 7. Estrutura característica da região do Pré-Sal.....	34

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Cronograma físico do projeto	19
Tabela 2. Principais componentes químicos do Cimento Portland.....	22
Tabela 3. Principais compostos do Cimento Portland	27
Tabela 4. Resultados coletados ao longo da revisão da literatura dos materiais pozolânicos provenientes de resíduos vegetais	40
Tabela 5. Resultados de resistência à compressão de pastas de cimento com adição de sílica flour (SF), cinza do bagaço de cana (CBC), metacaulim (MK) e cinza da casca de arroz (RC)	41

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
API	American Petroleum Institute
BWOC	By Weight of Cement
°C	Graus Celsius
C₂S	Silicato Dicálcico (Belita)
C₃A	Aluminato Tricálcico (Celita)
C₃S	Silicato Tricálcico (Alita)
C₄AF	Ferroaluminato Tetracálcico (Ferrita)
Ca(OH)₂	Hidróxido de cálcio (Portlandita)
Ca/Si	Relação cálcio/sílica
CH	Hidróxido de cálcio (Portlandita)
CPE	Cimento Portland Especial
CPP	Cimento Portland Para Poços de Petróleo
CSH	Silicato de Cálcio Hidratado
IAP	Índice de Atividade Pozolânica
NBR	Norma Brasileira Registrada
RC	Resistência a Compressão
RHC	Teor de água Quimicamente Combinada com o Hidróxido de cálcio
TG	Termogravimetria
TH	Teor de água quimicamente combinada com os Hidratos

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
2 METODOLOGIA.....	19
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
3.1 Cimento Portland.....	20
3.1.1 Fabricação e Composição	21
3.1.2 Hidratação e Endurecimento.....	27
3.1.3 Tempo de pega do cimento	28
3.2 Cimentação de Poços de Petróleo.....	29
3.3 Reservatórios do Pré-Sal	34
3.4 Impacto Ambiental	36
3.5 Materiais Pozolânicos	37
3.6 Cinza da folha de Bananeira.....	42
4 CONCLUSÃO.....	44
5 PERSPECTIVAS PARA TRABALHOS FUTUROS	45

1 INTRODUÇÃO

A utilização do cimento pode ser considerada um marco para a sociedade atual, pois tem sido uma solução economicamente viável para a construção de moradias, assentamento humano, obras e monumentos desde o início do século XX (SILVA, 2017). A indústria do petróleo tem perfurado poços desde o século passado e tem empregado o cimento Portland como material básico na cimentação (THOMAS, 2001). O processo de cimentação de poço de petróleo é uma das etapas mais importantes para as fases de perfuração e completação, tendo grande impacto sobre a produtividade do poço (GUO, 2006; MARINHO, 2004; BACKE e LILE, 1999).

Em poços de petróleo, o objetivo da cimentação é inserir a pasta de cimento entre o revestimento de aço e a formação rochosa de maneira a promover fixação e vedação eficientes e permanentes do anular com a parede do poço. Caso haja falhas na cimentação primária, é preciso corrigi-las com a cimentação secundária, um conjunto de operações emergenciais capazes de conter e remediar erros provenientes da primeira etapa de cimentação (ANJOS, 2009). As pastas cimentícias têm como função proteger e estabilizar a coluna de extração, promovendo maior durabilidade à coluna de aço e evitando contaminação tanto do fluido quanto da área ao redor através de vazamentos. Para tanto, é preciso conhecimento e controle de sua microestrutura, a qual deve ser adequada aos aumentos de temperatura e pressão inerentes ao poço de petróleo (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Adicionalmente, a produção do cimento gera danos ao meio ambiente e à saúde humana em quase todas as suas etapas de produção, gerando emissão tanto de materiais particulados quanto de gases de efeito estufa (MAURY, 2012). A extração da matéria-prima provoca degradação e alteração das áreas de mineração e de instalação das fábricas.

Apesar de suas qualidades e de seu uso generalizado, novos desafios têm sido propostos aos pesquisadores da área cimenteira (NASCIMENTO, 2006), promovendo o estudo de materiais com elevada eficiência tecnológica, energética e ambiental, ou seja, materiais com elevadas propriedades mecânicas que envolvam menores quantidades de energia no seu processo construtivo, gerem menos resíduos poluentes e também sejam mais facilmente reabsorvidos na natureza

(BARROSO,2009). Para tanto, estudos realizados acerca adições de materiais contendo em sua constituição uma sílica capaz de reagir com a cal livre do cimento, aumentando a quantidade de CSH produzido, provocou o surgimento de cimentos especiais com melhores propriedades mecânicas. A esses materiais adicionados foi atribuído o nome de “pozolana”.

Registros históricos relatam a adição de materiais pozolânicos como substitutos parciais do cimento Portland. Os romanos faziam uso de cinzas de origem vulcânica oriundas de Pozzuoli na Itália para erguer suas construções, dando origem à denominação pozolana (MARIA, 2011).

Pozolanas são materiais cuja composição química inclui sílica e/ou alumina, podendo ser classificadas, de acordo com a NBR 12653, como pozolanas naturais ou sintéticas (ABNT, 2012). As pozolanas naturais são materiais de origem vulcânica ou sedimentar com teor de SiO_2 maior que 65% (vidro vulcânico, tufo vulcânico); e as pozolanas sintéticas resultam de processos industriais ou de tratamento térmicos (cinza de casca de arroz, cinza volante, sílica ativa).

Essas adições minerais vêm sendo amplamente estudadas como forma de substituir cerca de 8-10% do cimento, podendo substituir em até 30% do cimento (SANTIAGO, 2014), e promover melhorias nas propriedades do produto final (KANNING, 2014). Com a reação pozolânica há uma diminuição do hidróxido de cálcio, resultando na formação de hidratos, os quais são responsáveis pelas propriedades mecânicas (MELO, 2012). Quando um material pozolânico é adicionado ao cimento, além das reações usuais que ocorrem com a adição de água, dá-se ainda a reação pozolânica, que é responsável pelo preenchimento de espaços vazios remanescentes das reações de hidratação, conferindo maior resistência à pasta, bem como maior durabilidade, visto que minimiza a quantidade de poros pelo surgimento de silicato de cálcio hidratado como produto da reação, o qual é o maior responsável pela resistência do cimento (MEHTA e MONTEIRO, 2008). Além dessas vantagens, as pozolanas são capazes de diminuir o calor de hidratação, aumentar a trabalhabilidade e aumentar a resistência ao ataque ácido, pontos bastante positivos em se tratando das condições de operação de poços de petróleo (MENEZES, 2009; NELSON, 1990).

Neville (1997) destaca o aumento do uso de materiais alternativos na construção civil nas décadas precedentes, dada a possibilidade de aumentarem a

durabilidade e o desempenho do concreto. Com isso é evidenciada a necessidade de maiores pesquisas acerca dos efeitos dessas adições e contribuições em pastas de cimento para poços de petróleo, sujeitas a condições específicas de temperatura, pressão, salinidade e carbonatação.

O emprego de resíduos como materiais pozolânicos, contribui para a redução de impactos ambientais, diminuindo custos e aprimorando a produção de cimento, atendendo aos requisitos de sustentabilidade, economia e ecologia (CINCOTTO, 1998). Além de vidro vulcânico, tufo vulcânico, sílica ativa, cinzas volantes, argilas calcinadas, metacaulim e escória granulada de alto-forno, há também a possibilidade de utilizar a cinza da casca de caju, o bagaço de cana-de-açúcar, a cinza da casca de arroz e a cinza da folha de bananeira, exemplos de resíduos naturais passíveis a ser utilizados como pozolanas (MARIA, 2011; ANJOS, 2009; KANNING, 2014).

A folha da bananeira é obtida no processo de desfolha do bananal, operação que traz benefícios ao cultivo da mesma, já que ocorre a eliminação das folhas dispensáveis à planta, propiciando maior luminosidade e arejamento à plantação e maior controle de pragas (ABANORTE). A grande quantidade de folhas da casca de bananeira, descartada periodicamente ao longo do bananal, pode ser utilizada para gerar energia elétrica através da sua queima, produzindo uma cinza com atividade pozolânica. De acordo com Cordeiro (2002), ela pode apresentar a atividade pozolânica após calcinação e moagem.

Sendo assim, é de suma importância para o meio ambiente o aproveitamento dos resíduos gerados pelas indústrias. Esses podem ser reciclados, reutilizados, transformados e incorporados, dando origem a novos produtos que atendam à demanda cada vez maior por tecnologias sustentáveis (SAVASTANO, 2000). É necessária a busca por novas tecnologias contemplando o uso de novos materiais pozolânicos para o emprego na cimentação de poços de petróleo, gerando benefícios tecnológicos, econômicos e ambientais.

É possível ainda aferir o grau de atividade pozolânica do material através do índice de atividade pozolânica (IAP), que consiste em submeter corpos de prova com as adições/substituições a ensaios mecânicos, por exemplo, com a finalidade de avaliar o aumento da resistência de acordo com a formulação utilizada através da comparação dos resultados (GAVA, 1999).

A partir das informações supracitadas, evidencia-se a importância da coleta de dados acerca dos diversos materiais pozolânicos utilizados nas formulações de cimentos de forma a embasar trabalhos futuros destinados à cimentação de poços de petróleo.

Baseado no exposto o objetivo geral deste trabalho é buscar o embasamento teórico para dar suporte a futuros trabalhos capazes de contribuir com o avanço da pesquisa acerca das adições pozolânicas em cimentos para poços de petróleo.

Os objetivos específicos encontram-se listados a seguir:

- Obter dados referentes às características e comportamento mecânico de resíduos utilizados como materiais pozolânicos em pastas de cimento Portland;
- Obter dados referentes ao potencial pozolânico da cinza da folha de bananeira;
- Definir melhores parâmetros de obtenção e processamento da cinza da folha de bananeira;
- Fornecer embasamento teórico e metodológico para formulação de pastas de cimento para poços de petróleo.

2 METODOLOGIA

Para o desenvolvimento do trabalho foi utilizada a metodologia de revisão sistemática, ou seja, foram realizados estudos observacionais retrospectivos com análise crítica da literatura. A hipótese levantada nos objetivos será confrontada através do levantamento e avaliação crítica de trabalhos já publicados tanto em acervo digital, quanto físico, fazendo uso dos mais diversos níveis de publicações, como das pesquisas realizadas no Laboratório de Cimento na UFRN (Núcleo Tecnológico em Cimentação de Poços de Petróleo, 'NTCPP'), artigos da Cement and Concrete Research, Construction and Building Materials e do portal Research Gate, bem como dados de órgãos de controle e censo cujo enfoque trate do tema aqui proposto. O levantamento foi realizado com materiais publicados nos últimos 15 anos. Será feita também uma breve síntese dos trabalhos com a finalidade de recuperar, selecionar e confrontar ou confirmar resultados de estudos relevantes.

Verifica-se na Tabela 1 o cronograma utilizado como ferramenta de planejamento para a confecção deste trabalho de conclusão.

Tabela 1. Cronograma físico do projeto.

Atividade/ Mês	1	2	3	4	5	6
Levantamento dos dados	X	X				
Seleção de periódicos e artigos, teses e dissertações	X	X	X	X	X	
Análise dos artigos e tabulação dos dados	X	X	X	X	X	X
Análise de dados da pesquisa bibliográfica	X	X	X	X	X	X
Preparação do TCC	X	X	X	X	X	X

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Cimento Portland

O vasto leque de aplicabilidade do Cimento Portland inclui ser também utilizado para cimentação de poços de petróleo. Essa versatilidade se deve às propriedades excepcionais apresentadas por esse material, capazes de se adequarem e apresentarem respostas satisfatórias às mais variadas condições ambientais de operação (TAYLOR, 1998). Contudo, desafios surgiram frente aos avanços tecnológicos e às descobertas ocorridas ao longo do tempo, exigindo dos cientistas da área cimenteira a melhoria contínua e o progresso condizentes com as circunstâncias.

Os cimentos são classificados como aglomerantes hidráulicos, em outras palavras, esse material endurece na presença de água, devido à ocorrência de reações de hidratação dos componentes cimentícios, resultando em produtos com propriedades mecânicas elevadas (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Ainda, o Cimento Portland é um material inorgânico finamente moído que, ao ser misturado com água, apresenta consistência de pasta. Ao longo do tempo, sofre reações chamadas de reações de hidratação, as quais são responsáveis por endurecer a massa cimentícia e conferir propriedades mecânicas e térmicas adequadas às condições normais de temperatura e pressão (BOTELHO, 2015).

Segundo MEHTA E MONTEIRO (2008), o Cimento Portland é um aglomerante hidráulico resultante da moagem do clínquer, o qual é composto basicamente por silicatos de cálcio hidráulicos. Os clínqueres são nódulos de 20 a 25 mm de diâmetro de um material sinterizado, produzido pelo aquecimento a altas temperaturas de uma mistura de matérias-primas de composições pré-determinadas. De acordo com o API (American Petroleum Institute), cimento é um aglomerante hidráulico obtido pela moagem do clínquer Portland com adição, durante a moagem, de gipsita (gesso) a fim de controlar o tempo de início de hidratação dos componentes (tempo de pega).

A produção e utilização de cimento é bastante antiga. Há relatos históricos de que seu uso iniciou-se no Antigo Egito, sendo composto basicamente por gesso impuro e cal. Gregos e romanos adicionaram pedras e areia à mistura utilizada pelos

egípcios, dando origem ao primeiro concreto da história. Em 1824, John Aspdin patenteou o aglomerante de nódulos calcinados de calcário argilado em proporções específicas, chamando-o Cimento Portland (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

3.1.1 Fabricação e Composição

Ao aquecer uma mistura de calcário, argila, óxido de ferro e adições à temperatura de cerca de 1400 °C é obtido o clínquer Portland. A composição final desse clínquer é determinada pelos teores adotados das matérias-primas e pela temperatura de clinquerização (NELSON, 1990).

Para dar início ao processo de fabricação, é necessário extrair o calcário da jazida, triturá-lo no britador a fim de diminuir seu tamanho de partícula e adicioná-lo à argila. Em sequência, essa mistura é levada ao moinho de bolas, onde permanecerá durante tempo necessário até que seja gerado um pó extremamente fino (farinha de cru). Esse pó é transportado até os silos, onde será balanceado em proporção adequada à produção de cimento por meio de peneiras (TAYLOR, 1998). Após o balanceamento, o pó é colocado em um forno rotativo e submetido à temperatura de mais ou menos 1400 °C, permitindo a ocorrência das reações químicas que darão origem ao clínquer. Ao sair do forno, o clínquer é resfriado até a temperatura ambiente, mantendo as características físico-químicas do produto final e, então, é moído juntamente com o sulfato de cálcio (gipsita/gesso), que tem como finalidade controlar o tempo de pega. Esse processo resulta na obtenção efetiva do cimento pronto para comercialização (NEVILLE, 1997).

Na produção do Cimento Portland, ao serem aquecidas as matérias-primas, é fornecida a energia necessária para a ocorrência das reações químicas de clinquerização. Há, portanto, uma série de etapas a serem perpassadas até que o produto final seja alcançado. Ao aquecer a mistura até 100 °C, a água livre é totalmente evaporada; a 450 °C é observada a perda de água adsorvida; a ativação dos silicatos por desidratação e alterações na rede cristalina se dão na temperatura de 700 °C; a faixa entre 700 e 900 °C compreende a decomposição dos carbonatos; finalmente, entre 900 e 1200 °C ocorre a clinquerização, envolvendo a formação de silicatos bicálcicos (C_2S), aluminatos tricálcicos (C_3A) e ferroaluminato tetracálcico

C₄AF, resultado da fusão do aluminato e da ferrita. Acima de 1200 °C há o surgimento da fase líquida, constituída pela combinação de parte dos óxidos de cálcio com óxidos de alumínio e ferro, promovendo a formação do silicato tricálcico C₃S, a partir do silicato bicálcico previamente formado (COUTINHO, 2002; NELSON, 1990). Por exemplo, uma das reações que ocorrem durante o processo de clínquerização é o de decomposição do carbonato de cálcio (CaCO₃), a qual ocorre a cerca de 805 °C e é regida pela equação a seguir:



Os principais componentes do cimento são silicato tricálcico C₃S, silicato dicálcico C₂S, aluminato tricálcico C₃A e ferroaluminato tetracálcico C₄AF, resultados da mistura estequiométrica de Cal (C), Sílica (S), Alumina (A) e Óxido de Ferro (F). A composição química do Cimento Portland pode ser observada na

Tabela 2. Composição química do cimento Portland.

Principais componentes químicos do Cimento Portland	
Cal (CaO)	60% a 67%
Sílica (SiO ₂)	17% a 25%
Alumina (Al ₂ O ₃)	3% a 8%
Óxido de ferro (Fe ₂ O ₃)	0,5% a 6%

(Fonte: THOMAS, 2001)

Os compostos químicos utilizados para a produção do cimento nem sempre são iguais devido à presença em solução sólida de impurezas como MgO, TiO₂, MnO₂, K₂O e Na₂O, sendo esses dois últimos os álcalis, responsáveis por alterar a velocidade de pega, alterando a velocidade de endurecimento da pasta e provocando reações deletérias com agregados reativos (MEHTA E MONTEIRO, 2008; NEVILLE, 1997). Durante a etapa de moagem, é adicionado o sulfato de cálcio (CaSO₄) na forma de gesso (CaSO₄.2H₂O), semi-hidratado ou anidro (CaSO₄.1/2H₂O), para controle da hidratação inicial do cimento (TAYLOR, 1998).

Os compostos do clínquer serão mais detalhados a seguir (MEHTA E MONTEIRO, 2008):

a) Belita (C_2S)

A 550°C é observada a primeira reação de clinquerização, ocorrendo a perda de água e o surgimento das fases de silicatos. O silicato dicálcico (C_2S) é formado de acordo com a equação abaixo (GOTHENBURG, 1997).



Kacimi (2009) discutiu a formação do silicato bicálcico ou belita, a qual encontra-se microestruturalmente retratada na Figura 1 através de microscopia eletrônica de varredura (MEV). Quando observada por microscopia ótica, aparece mais frequentemente sob a forma arredondada, podendo ainda apresentar reentrâncias e saliências que se assemelham a dedos, que é então denominada C_2S digitado. O silicato dicálcico reage lentamente com a água, desprendendo menos calor ao hidratar-se quando comparado ao C_3S , contribuindo de maneira discreta para a resistência inicial do cimento, porém tendo papel fundamental quando analisada a resistência a longo prazo.

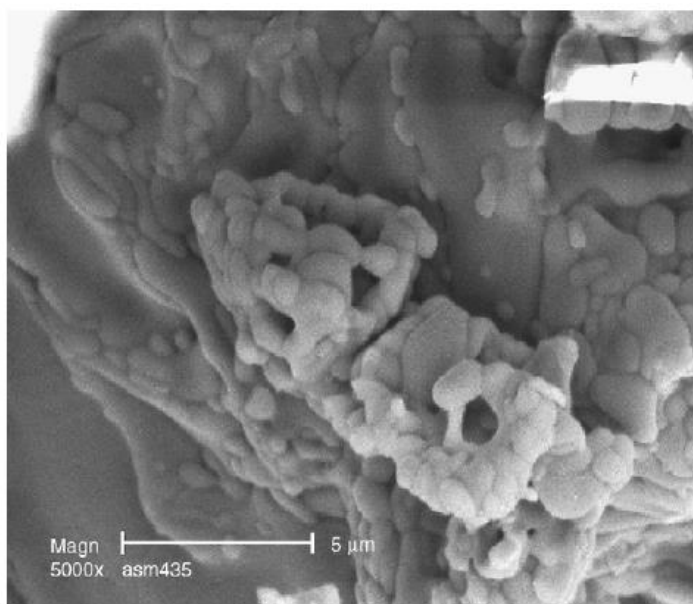


Figura 1. Morfologia do Silicato Dicálcico. (KACIMI, 2009)

O C_2S com dopantes a base de óxidos, provenientes da matéria-prima, pode apresentar-se sob três sistemas: ortorrômbico, trigonal e cúbico. Isso acontece de acordo com o fluxograma exibido abaixo.

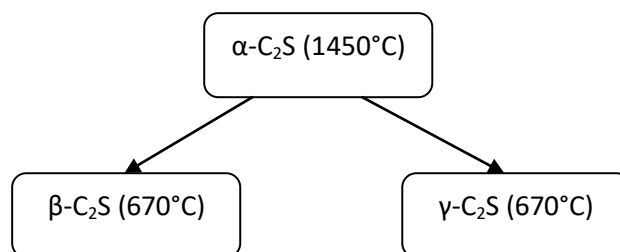


Figura 2. Fluxograma referente às transformações polimórficas da Belita.

As estruturas cristalinas da belita beta e gama estão representadas nas Figuras 3.

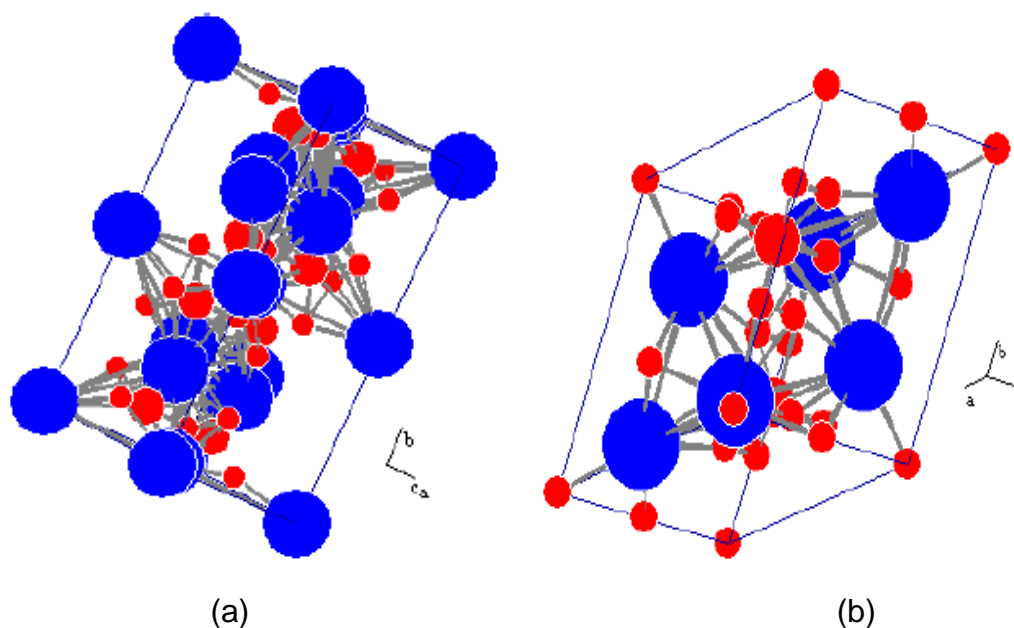


Figura 3. Estrutura cristalina do (a) C_2S de acordo com MUMME, 1995 apud MELO, 2012 e (b) C_2S hexagonal de acordo com PEREZ, 1984 apud MELO, 2012.

b) Alita (C_3S)

O silicato tricálcico principia a ser produzido numa faixa entre 1250 e 1450°C de acordo com a reação abaixo:



O C_3S ou alita é o principal componente da maioria dos clínqueres de cimento Portland, podendo encontrar-se formando compostos sólidos com Fe, Mg, Na, K, Cr, Al, T e Mn, na forma de óxidos em sua maioria. Contudo, durante o resfriamento do clínquer, o C_3S pode vir a se decompor, gerando C_2S e cal livre, gerando um cimento cujo desempenho encontra-se aquém do esperado devido à produção de um clínquer defeituoso. As propriedades hidráulicas e mecânicas do cimento dependem majoritariamente da alita, pois a mesma reage rapidamente com a água provocando uma imediata liberação de calor e elevada resistência inicial (1 a 28 dias) (MELO, 2012). Porém a quantidade de calor desprendido é bastante inferior ao C_3A e sua hidratação tem início após poucas horas a partir do contato com a água (NELSON, 1990).

c) Celita (C_3A)

Cimentos de alta resistência inicial geralmente apresentam maior percentual desse componente, de maneira que o tempo decorrido entre o início e o fim da pega do cimento é de poucas horas. Seu aparecimento se dá juntamente à formação dos silicatos, sendo considerada uma fase intersticial. A reação de formação do Aluminato tricálcico ou Celita ocorre a cerca de 1300°C e pode ser representada pela Equação 4 abaixo (SANTOS JÚNIOR, 2006 apud MELO, 2012).



O Aluminato tricálcico apresenta-se como um cimento vítreo junto com o C_4AF no clínquer, por isso é caracterizado como fase intersticial do cimento. Apresenta-se normalmente na forma cúbica quando resfriado lentamente ao sair do forno. Esse composto forma soluções sólidas com o Fe_2O_3 , MgO e os álcalis. Vale salientar que, na presença de álcalis como o Na_2O , o C_3A tende a cristalizar-se sob a forma acicular (TAYLOR, 1998).

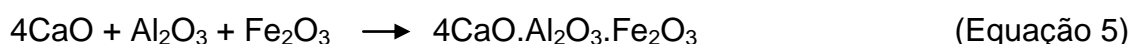
A taxa de resfriamento do cimento influencia diretamente na quantidade de C_3A disponível para hidratação e, portanto, também na resistência mecânica inicial,

já que esse componente é o principal responsável pela pega do cimento, pois reage rapidamente com a água e se cristaliza em poucos minutos. Quanto mais lentamente o clínquer for resfriado, maior a quantidade de C_3A disponível e mais curto será o tempo de cura (NELSON, 1990).

Esse desenvolvimento rápido de resistência mecânica no início do processo de hidratação da pasta é devido à capacidade da Celita de liberar o maior calor de hidratação (quantidade de calor desenvolvida durante as reações de pega e endurecimento da pasta) em comparação aos outros compostos. Contudo, essa característica resulta em propriedades indesejáveis ao cimento quando não são bem controladas, como baixa resistência aos sulfatos e variação volumétrica, com o consequente aumento do calor de hidratação. A fim de evitar a pega prematura ao injetar o cimento no poço, o cimento de alta resistência deve ter menos que 3% de C_3A em sua composição (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

d) Ferrita (C_4AF)

O Ferro-aluminato tetracálcico ($Ca_4Al_2Fe_2O_{10}$, C_4AF , ferrita ou brownmillerite) constitui, juntamente com a celita, a fase intersticial do clínquer. Sua reação de formação se dá a temperaturas por volta de $1300^{\circ}C$, podendo ser expressa da seguinte maneira (SANTOS JÚNIOR, 2006):



Essa fase é uma solução sólida, porque não possui um composto definido, podendo assumir a forma de C_2F a C_8A_3F . A ferrita é o componente que confere a coloração cinzenta ao cimento, exatamente devido à presença do ferro. Esse composto libera baixo calor de hidratação, reagindo menos rapidamente que o C_3A . Ele também tem pouca participação efetiva na resistência aos esforços mecânicos no cimento, porém controla a resistência química, retardando sua corrosão (TAYLOR, 1998).

Pode-se constatar o término da reação de clinquerização quando a mistura é resfriada. Durante esse processo, pode ocorrer o retorno do óxido de cálcio (CaO – cal livre) (SANTOS JUNIOR, 2006), conforme a reação abaixo (Equação 5):



Além dos compostos citados anteriormente, existem os secundários, como MgO, TiO₂, MnO₂, K₂O e Na₂O. Os álcalis podem acelerar a pega do cimento, podendo encontrar-se na forma de dopantes nos C₂S e C₃S. Esses óxidos também influenciam nas propriedades de resistência à compressão (SANTOS JUNIOR, 2006).

Abaixo está tabelado um resumo do que foi abordado neste tópico.

Tabela 3. Principais compostos do cimento Portland.

Composto	Constituição	Fórmula	Símbolo	% em massa
Silicato tricálcico	3CaO.SiO ₂	Ca ₃ SiO ₅	C ₃ S	50-70
Silicato dicálcico	2CaO.SiO ₂	Ca ₂ SiO ₄	C ₂ S	15-30
Aluminato tricálcico	3CaO.Al ₂ O ₃	Ca ₃ Al ₂ O ₆	C ₃ A	5-10
Ferro-aluminato tetracálcico	4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃	Ca ₄ (Al/Fe) ₂ O ₁₀	C ₄ AF	5-15

(Fonte: THOMAS, 2001)

3.1.2 Hidratação e Endurecimento

Na química do cimento, o termo 'Hidratação' refere-se ao conjunto de transformações ocorridas quando o cimento anidro ou alguma de suas fases entra em contato com água. Essas reações são compostas por eventos complexos, marcados pela conversão de espécies anidras em seus respectivos hidratos através da inserção de água em suas moléculas (TAYLOR, 1998).

O aumento da resistência mecânica da pasta decorre da hidratação do cimento. As reações de hidratação dos compostos dão origem à Portlandita, Ca(OH)₂, e ao CSH. Esse último apresenta-se na forma de um sólido poroso de baixa cristalinidade, assemelhando-se a um gel rígido. Sua estrutura é normalmente

lamelar em formato acicular, podendo apresentar-se de forma diferente dependendo do espaço livre para sua precipitação, o que está diretamente relacionada à relação água-cimento (NELSON, 1991).

O CSH pode assumir diversas estequiometrias. Fatores como a relação CaO/SiO_2 , temperatura, tempo de cura e aditivos afetam as propriedades do CSH, podendo variar até mesmo sua estrutura, assumindo formas semicristalinas ou cristalinas (BLACK *et al.*, 2003).

A reatividade das fases do clínquer é afetada pela presença de elementos substituintes como sódio e potássio em solução sólida com os compostos do cimento. Esses permitem hidratar-se mais rapidamente em comparação ao C_3S e o C_2S puros. A taxa de hidratação durante os primeiros dias pode ser representada, aproximadamente, da seguinte maneira: $\text{C}_3\text{A} > \text{C}_3\text{S} > \text{C}_4\text{AF} > \text{C}_2\text{S}$ (JAWED, 1983 apud MELO, 2012).

Ao adicionar água ao cimento, além de modificar a consistência do mesmo, também há o desencadeamento das reações de hidratação dos compostos presentes. Independente da classificação do Cimento Portland, todas as reações acontecem da mesma maneira, variando apenas sua cinética. Essa velocidade depende da quantidade de cada composto presente e da granulometria do cimento (HIBBELER *et al.*, 2000).

As maiores contribuições para a composição da fase aquosa em contato com o cimento são os silicatos de cálcio (Ca^{2+} e OH^-), celitas e ferritas (Ca^{2+} e $\text{Al}(\text{OH})_4^-$), sulfato de cálcio (Ca^{2+} e SO_4^{2-}) e sulfatos alcalinos (Na^+ , K^+ e SO_4^{2-}) (TAYLOR, 1998).

A dissolução das fases anidras do clínquer resulta na formação de compostos com solubilidade menor, levando à precipitação de hidratos, os quais constituem a pasta endurecida (JAWED, 1983).

3.1.3 Tempo de pega do cimento

Esse é um fator importante nas pastas de cimento para poços de petróleo. A escolha do cimento, e conseqüentemente do tempo de pega a ser trabalhado, depende da temperatura do poço (BENSTED, 1993 apud MELO, 2012). O início da pega da pasta é percebido quando esta perde sua plasticidade, evidenciando o

endurecimento provocado pelas reações de hidratação discutidas anteriormente. Esse início da pega corresponde ao aumento repentino da consistência da pasta e uma elevação da sua temperatura, concomitante à liberação do calor de hidratação referente às reações. O fim da pega é ditado pela impossibilidade de deformação quando solicitado por baixas cargas, tornando-se um bloco rígido. Deste momento em diante, há apenas um processo de aumento de coesão e resistência, características da fase de endurecimento (NELSON, 1990).

O tempo de pega será ditado pelas condições ambientais do poço e da composição química do cimento. Como foi dito anteriormente, um cimento com maior quantidade de Celita apresenta um menor tempo de pega, liberando maior calor de hidratação, por exemplo (TAYLOR, 1998).

3.2 Cimentação de Poços de Petróleo

Em 1883 na Califórnia o cimento foi utilizado pela primeira vez em poços de petróleo, porém apenas em 1903 é que passou a ter função de isolamento e vedação, impedindo a infiltração de água, aumentando a eficiência na prospecção do óleo, evitando chances de perda do poço (HALLIBURTON, 1998).

A Al Perkins funda, em 1905, o que viria a ser a maior empresa californiana na especialidade e, em 1910, patenteou a operação de cimentação com dois tampões, um à frente e um atrás da pasta, evitando sua contaminação durante o deslocamento por água de fluido de perfuração (HALLIBURTON, 1998 apud MELO, 2012).

Em 1918, foi criada a primeira companhia de serviço especializada na cimentação de poços petrolíferos (Companhia Perkins), localizada em Los Angeles. No ano seguinte, surgiu a Companhia de Serviço Halliburton, no norte da Califórnia, que é ainda atuante (HALLIBURTON, 1998).

Erle P. Halliburton patenteou o misturador com jatos (Jet Mixer) em 1922, automatizando a mistura da pasta, permitindo que outras companhias adotassem a prática de cimentação, visto que ampliava as possibilidades operacionais. (HALLIBURTON, 1998).

Em 1923, fabricantes americanos e europeus começaram produzir cimentos especiais para a indústria de petróleo com alta resistência inicial. Com o advento dos

aditivos, propriedades, como tempo de pega, foram paulatinamente modificadas e controladas de acordo com a aplicação (BEZERRA, 2006).

A cimentação do poço tem função primordial de promover a vedação entre as zonas permeáveis, impedindo a contaminação por intercomunicação de fluidos da formação geológica com os fluidos a serem explorados. Após a perfuração do poço, essa é uma das operações mais importantes, visto que viabiliza uma condição segura e economicamente positiva, garantindo a exploração durante toda a vida produtiva do poço. Além disso, a atividade de cimentação oferece ainda suporte mecânico ao revestimento e protege os tubos de aço contra danos provocados por ambientes corrosivos (MELO, 2012).

A operação se dá após a descida da coluna de revestimento, visando preencher o espaço anular remanescente entre a tubulação de revestimento e as paredes da formação geológica, de modo a fixar a tubulação e evitar migrações de fluidos (SANTIAGO, 2014).

A cimentação do anular é feita através do bombeamento da pasta de cimento e água, inserida através da própria tubulação de revestimento. Quando a pasta endurece, o cimento deve permanecer intimamente aderido à superfície externa do revestimento e à parede do poço (THOMAS, 2001). Essa operação é influenciada por inúmeros fatores, podendo destacar alguns deles como temperatura, pressão, retração, permeabilidade da pasta, propriedades da formação, etc. (BACKE, 1999).

A finalidade da cimentação engloba os seguintes propósitos:

- Prevenir migrações indesejadas de fluidos de uma formação para outra;
- Prevenir contaminação do óleo;
- Proteger o revestimento de desmoronamentos;
- Proteger o tubo de aço contra danos em ambientes corrosivos.

A cimentação primária é a cimentação principal da coluna de revestimento. Com ela, visa-se inserir a pasta de cimento não contaminada (sem contato com o fluido de perfuração) no espaço anular, localizado entre a coluna de revestimento e o poço (SANTIAGO, 2014).

Uma cimentação mal elaborada reduz a vida útil do poço e torna o processo mais oneroso, sendo, portanto, uma atividade vital para a exploração das jazidas. Sua qualidade e eficiência são avaliadas por meio de perfis acústicos propagados através do revestimento (PELIPENKO, 2004).

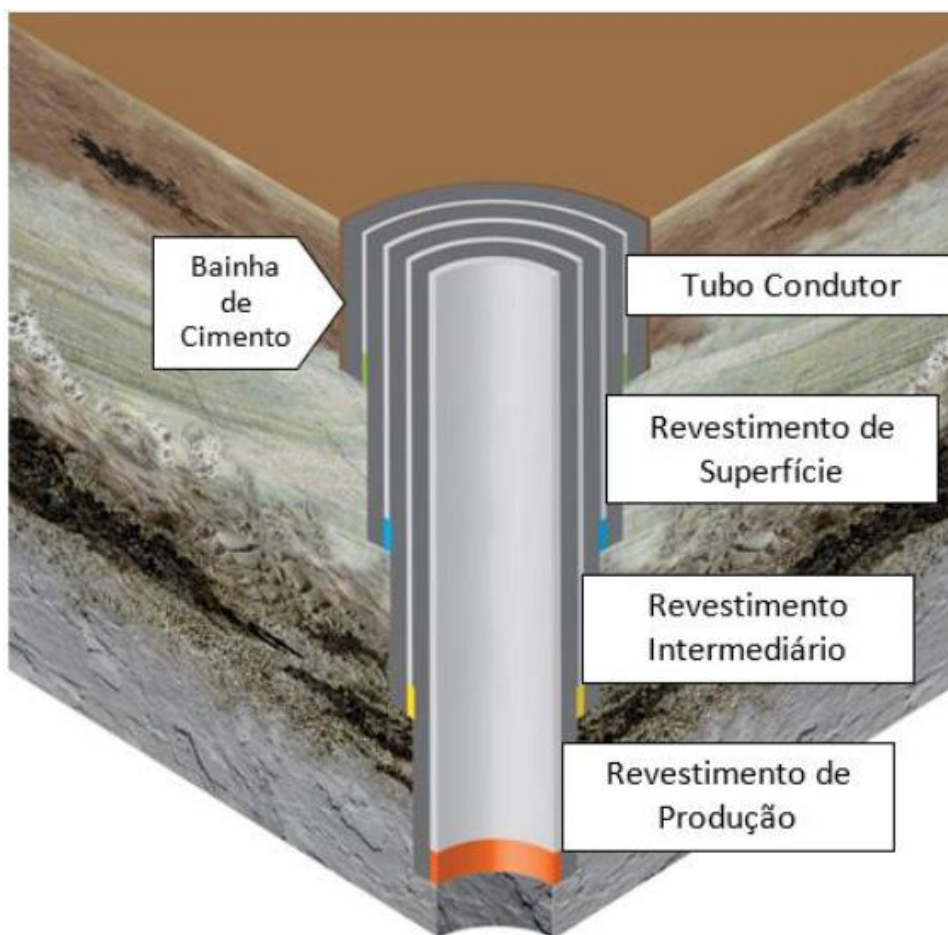


Figura 4. Cimentação primária

(Fonte: COSTA, 2012 apud SANTIAGO, 2014)

O revestimento condutor é o primeiro revestimento do poço e visa sustentar sedimentos superficiais não consolidados, conferindo estabilidade geológica ao poço. O revestimento de superfície irá proteger os horizontes superficiais, prevenindo o desmoronamento das formações, além de servir como base de apoio para equipamentos de segurança de cabeça de poço. O revestimento intermediário tem a finalidade de isolar e proteger zonas de altas ou baixas pressões, zonas de perda de circulação, formações desmoronáveis, formações portadoras de fluidos corrosivos ou contaminantes de lama. Ao final, é observado o revestimento de

produção, utilizado a fim de promover a produção do poço, suportando suas paredes e possibilitando o isolamento entre os vários intervalos produtores (THOMAS, 2001). Melo (2012) afirma que “a função operacional da cimentação primária é de produzir um selo hidráulico impermeável cimentoso no anular”.

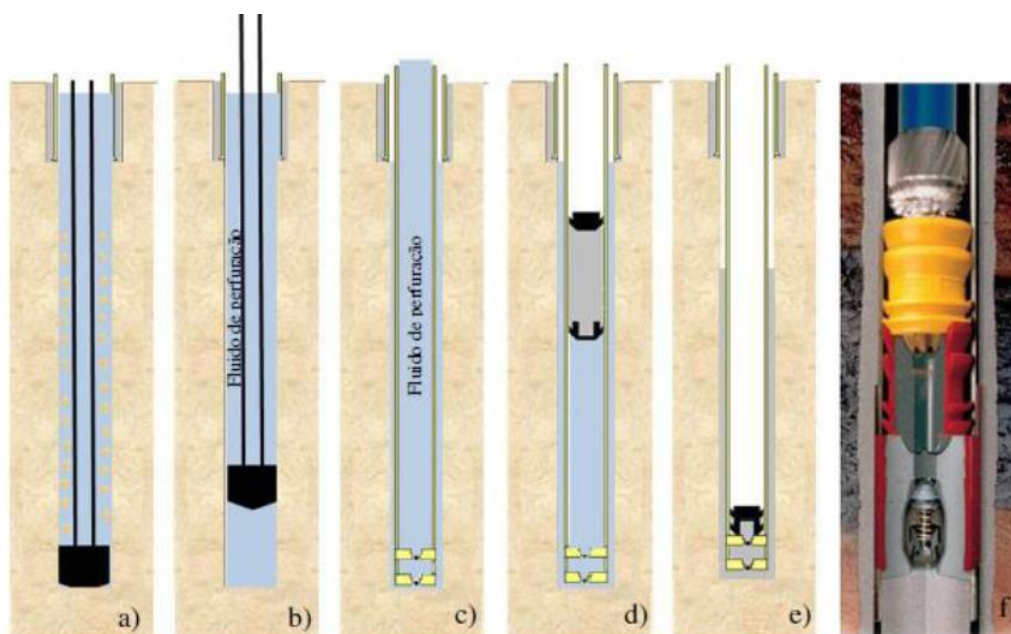


Figura 5. Sequência de uma cimentação primária.

(Fonte: Souza, 2006 apud Santiago, 2014).

Thomas (2001) descreve a sequência de operações da cimentação primária da seguinte maneira:

Antes de dar início à cimentação propriamente dita, deve-se atentar à limpeza do poço, que pode ser realizada através do condicionamento através da circulação de um fluido de perfuração com, pelo menos, o volume do espaço anular, podendo lançar mão de um tampão viscoso com a finalidade de facilitar a remoção de possíveis cascalhos retidos no fundo do poço. Simultaneamente, as linhas de cimentação são montadas e são preparados os colchões (lavador e espaçador), que irão auxiliar na limpeza mais eficiente das paredes do poço, a fim promover melhor interação entre o cimento e a formação rochosa. Esses colchões são precedentes à injeção da pasta de cimento, separados por um tampão, chamado tampão de fundo, o qual permanece junto ao colar flutuante na coluna de revestimento próximo ao fundo do poço (THOMAS, 2001).

Contudo, isso se trata de uma operação bastante complexa, já que deve enfrentar problemas como densidade incorreta da pasta, fluxo de gás, aderência deficiente na interface, gelificação prematura, entrada de gás na coluna de pasta, contração volumétrica, variação brusca de temperatura e pressão, entre outros (THOMAS, 2001). Na figura abaixo está retratado um caso corriqueiro de falha de cimentação.

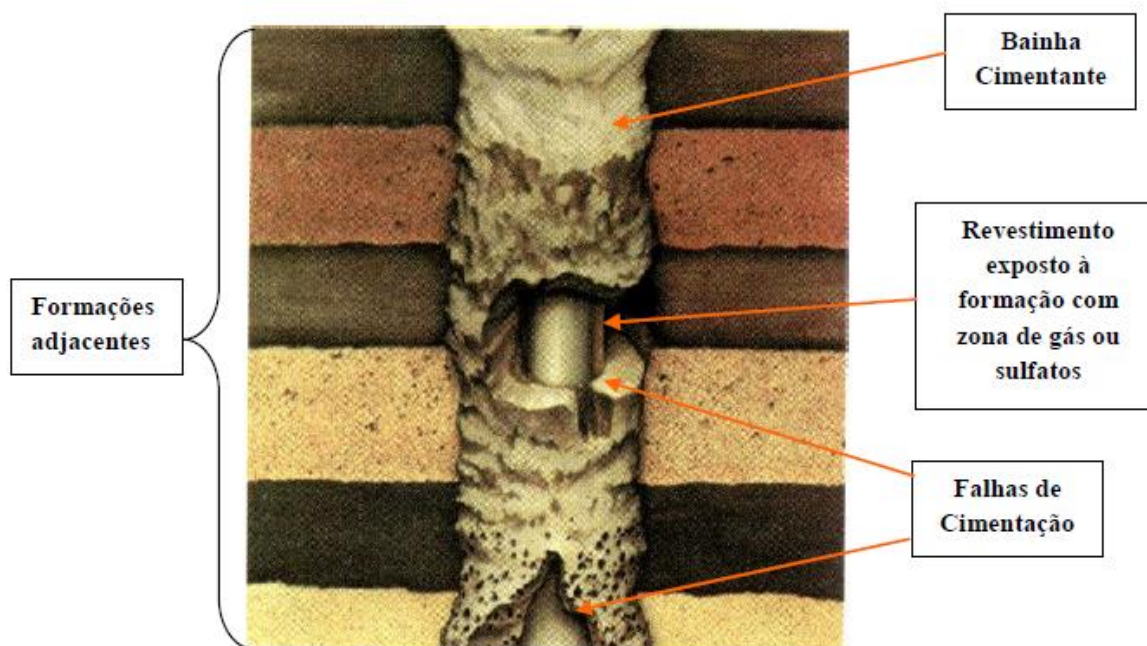


Figura 6. Poço com falha de cimentação.

(Fonte: THOMAS, 2001)

Diz-se que a cimentação primária foi feita com sucesso quando há boa aderência ao revestimento e à formação rochosa, preenchendo completamente todo o espaço anular. A fim de atingir a eficiência máxima, inúmeros testes são realizados em laboratórios para tentar prever o comportamento das pastas durante o seu bombeio no espaço anular.

Apesar de todos os esforços, nem sempre é possível obter sucesso em toda a extensão do poço, sendo necessária uma nova operação de cimentação para corrigir as falhas remanescentes. Dá-se então o nome de cimentação secundária, utilizada para abandonar zonas esgotadas e, também, às atividades emergenciais que almejam corrigir falhas ocorridas a fim de permitir continuidade das operações sem perda ou contaminação do óleo, garantindo o isolamento e reparando vazamentos nas colunas de revestimento (THOMAS, 2001).

3.3 Reservatórios do Pré-Sal

Atualmente o desafio da indústria petrolífera baseia-se em encontrar novos materiais e meios de explorar as bacias petrolíferas submarinas.

Com a ação conjunta de fatores geológicos e climáticos, petróleo e gás alojaram-se no subsolo marinho, abaixo de uma camada de sal sob águas profundas e distantes da costa. Esses reservatórios, com imensas jazidas, estão cobertos com uma camada salina, a qual aprisiona a matéria orgânica (hidrocarbonetos), tornando viável a exploração do poço em termos de oferecer condições necessárias para geração de petróleo e também de perfuração em profundidades elevadas. Pré-sal foi o nome dado à formação rochosa porosa abaixo da camada evaporítica (salina) podendo ser encontrada a cerca de 7 km de profundidade, incluindo a lâmina d'água. A Figura 7 mostra uma representação da profundidade da camada do pré-sal com suas camadas.

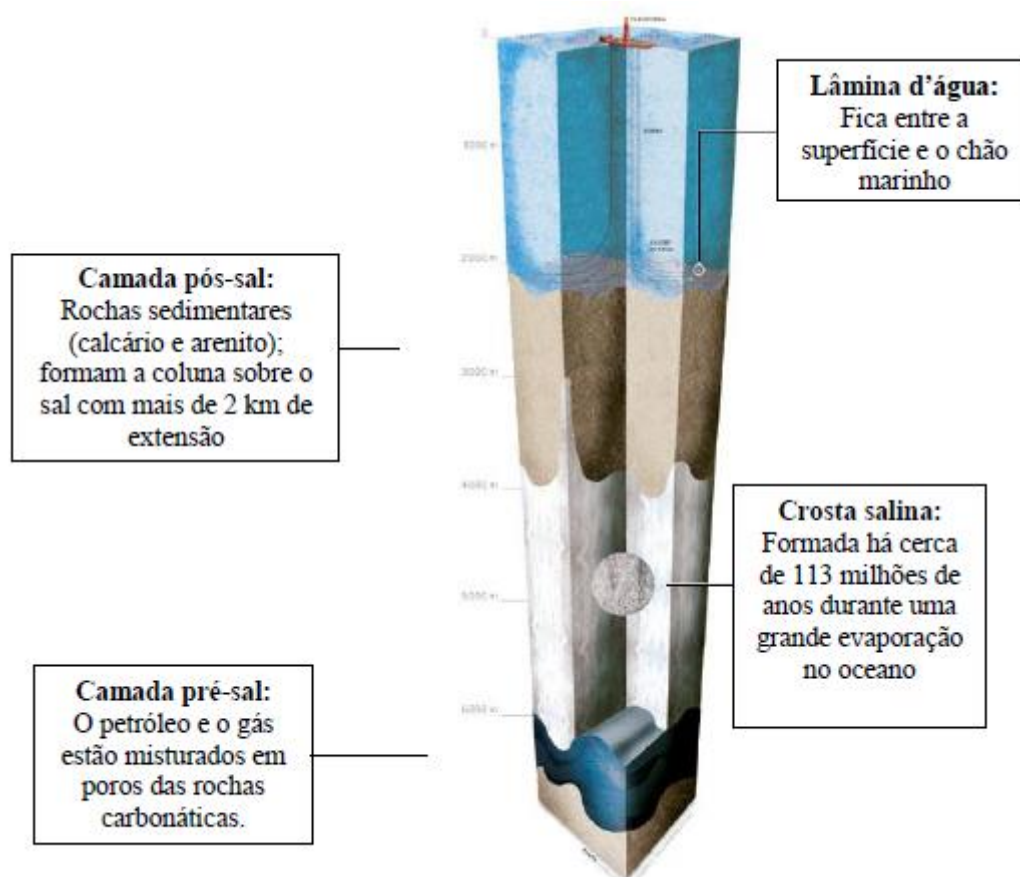


FIGURA 7. Estrutura característica da região do Pré-Sal.

(Fonte: Adaptado de OLIVEIRA, 2008 apud MELO, 2012)

A perfuração de um poço de petróleo demanda intenso planejamento a fim de perpassar os desafios inerentes ao processo. Isso se intensifica quando se trata do Pré-Sal, porque a camada salina é encontrada com diferentes características na natureza, apresentando comportamentos distintos, como a propriedade de fluxo plástico, ou seja, a capacidade de fluir (ROCHA e AZEVEDO, 2007). O sal, portanto, exibe comportamento de fluência, sofrendo deformações ao longo do tempo com a finalidade de aliviar tensões. Essa é a diferença primordial no comportamento mecânico em relação às demais rochas sedimentares.

A fluência ocorre devido às altas pressões na camada e pode variar de maneira discrepante, sendo imperceptível em alguns casos, e em outros, capaz de levar a coluna de perfuração ao colapso. Existe uma taxa em que o sal flui, a qual depende da profundidade de soterramento, temperatura da formação, composição mineralógica, quantidade de água, presença de impurezas (argilas) e intensidade com que as tensões são aplicadas no corpo de sal (ROCHA e AZEVEDO, 2007). Há ainda a necessidade de modelagem do poço, um planejamento feito através de modelos numéricos experimentais feitos por programas de computador capazes de reproduzir as condições marítimas ou do solo e calcule a dinâmica dos navios e plataformas (MELO, 2012).

Ao ultrapassar a camada de sal, é preciso atentar quanto à integridade do poço, evitando desmoronamento para que este seja consolidado e preservado sem maiores incidentes, como o aprisionamento da broca. As equipes de perfuração e exploração devem ser ágeis a fim de manter a estabilidade do poço, recuperar a coluna de perfuração e revestir e cimentar o poço. A pressão exercida pelo sal pode deformar o tubo de revestimento, além de ser considerado ambientalmente agressivo ao cimento e corrosivo ao aço (MELO, 2012).

Para tanto, surge a necessidade de confeccionar novas composições de pastas que apresentem resistência mecânica elevada capaz de suportar as solicitações tanto do ambiente marítimo – oscilações, altas pressões da coluna de água, correntes marítimas – quanto da estrutura geológica.

3.4 Impacto Ambiental

A fim de evitar possíveis desastres ambientais, toda ação deve passar pela etapa de análise ou estudo de impacto ambiental (EIA) antes da tomada de decisão levando à sua instalação e posterior operação. Isso implica dizer que todos os possíveis acontecimentos e interações ocorridos durante a perfuração e cimentação devem ser previstos, visando evitar possíveis danos irreparáveis ao meio ambiente (RIBEIRO, 2017).

A produção de cimento gera impactos ao meio ambiente e à saúde humana em quase todas as suas fases de produção. Embora os processos tenham sido otimizados ao longo do tempo, ainda há registros de danos consideráveis em algumas regiões. Isso gera problemas ambientais e também na saúde dos indivíduos que vivem nos arredores dessas fábricas, desde a matéria-prima, que gera degradação e alteração na fauna e flora da região próxima às fábricas e às áreas de mineração, passando pela emissão de finos, capazes de provocar problemas respiratórios, até o macroimpacto da produção do clínquer, que é responsável pela emissão de gases de efeito estufa (MAURY E BLUMENSCHNEIN, 2012).

Com o advento dos ‘movimentos verdes’, a comunidade científica voltou seus olhos para todos os processos com a finalidade de aperfeiçoá-los ao máximo, promovendo a mínima agressão ao meio ambiente. No ramo cimenteiro, há a possibilidade de substituir parcialmente o cimento por um material fino, amorfo e com grande quantidade de sílica ou silicoaluminatos, produzidos laboratorialmente ou encontrados na natureza. A esse material deu-se o nome de Pozolana, e seu uso, de acordo com relatos históricos, data do Império Romano, talvez até antes (MARIA, 2011).

As pozolanas de origem natural são frutos de tratamentos de materiais descartados, ou seja, resíduos sólidos que apresentam em sua constituição altos teores de sílica capaz de reagir com a cal livre produzindo CSH. Como foi dito no início desse parágrafo, a pozolana natural é proveniente de resíduos sólidos, os quais são retirados do meio ambiente, evitando sua poluição, e ‘reciclados’, conferindo a eles uma nova função e um novo desempenho (NELSON, 1991).

Vale salientar que a utilização de materiais pozolânicos provoca ganho também nas propriedades mecânicas do cimento, tornando-o mais resistente e apto para suportar maiores solicitações mecânicas (TAYLOR, 1998). Esse aumento da resistência mecânica deve-se à ocorrência da reação pozolânica.

A reação pozolânica ocorre quando a pozolana entra em contato com o hidróxido de cálcio na presença de umidade, tendo como produtos compostos aglomerantes análogos aos do cimento Portland. Esses produtos irão preencher os vazios remanescentes da etapa de hidratação do Cimento Portland, justificando o ganho nas propriedades mecânicas, visto que diminui o número de defeitos presentes na pasta. Como foi dito anteriormente, existem requisitos para classificar um material como pozolânico ou não, tais como quantidade de sílica reativa presente na composição, amorficidade e área específica. Vários materiais podem ser classificados como tal. O tópico seguinte retrata alguns deles.

3.5 Materiais Pozolânicos

A NBR12653 (ABNT, 1992) define pozolana como material silicoso ou silicoaluminoso que, possuindo pouca ou nenhuma atividade aglomerante, na presença de água e finamente moído, reage com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente formando compostos com propriedades cimentantes. Esses materiais podem ser de origem natural ou artificial, desde que contenha sílica na forma reativa.

Seu nome remonta ao Império Romano, quando cinzas foram encontradas nas imediações da cidade de Pozzuoli, na Itália. Essas cinzas eram constituídas de materiais amorfos com altos teores de sílica (SiO_2) (MARIA, 2011).

As cinzas podem ser de origem vulcânica, resultados de tratamentos térmicos de argilas e moagem ou até mesmo provenientes de subprodutos industriais. O emprego de pozolanas implica na diminuição direta do consumo de cimento, tendo como impacto extremamente positivo a redução da exploração das jazidas de argila e calcário (MAURY E BLUMENSCHNEIN, 2012).

Os Materiais Pozolânicos segundo a NBR 12653 (ABNT, 1992) são classificados em N, C e E. Os materiais pozolânicos de classe N consistem nas naturais e artificiais, sendo os materiais vulcânicos de caráter petrográfico, terras

diatomáceas e argilas calcinadas. Os da classe C são cinzas volantes produzidas através da combustão de carvão mineral em usinas termoelétricas. As de classe E são as não enquadradas nas classes anteriores. De acordo com Kanning (2010), há ainda uma classe F, destinada às cinzas volantes produzidas pela incineração do carvão betuminoso ou antracito que apresentam atividade pozolânica.

Para denominar um material como “pozolânico” é preciso realizar um teste para aferir sua pozolanicidade, no qual se mede o grau de agrupamento entre pozolana e hidróxido de cálcio (ANJOS, 2009).

Vidros vulcânicos são rochas vulcânicas extrusivas compostas por material vítreo, resultado da estabilização de lavas ácidas, apresentando uma estrutura microporosa que propicia elevada superfície específica (MARIA, 2011).

Quando a rocha vulcânica apresenta granulometria classificada como média ou fina, dá-se o nome de tufo vulcânico. Elas são resultantes da ação hidrotérmica sobre os depósitos de materiais magmáticos e a pulverização das rochas pré-existentes (MEHTA E MONTEIRO, 2008). O tufo vulcânico pode ser lítico, cristalino ou vítreo.

Mais um tipo de pozolana oriunda da deposição de óxidos solúveis lixiviados resultando em sílica gel hidratada é a sílica opalina. Elas são altamente reativas à cal e sua elevada área de superfície demanda consumo excessivo de água, sendo prejudicial à durabilidade e à resistência do concreto (MEHTA E MONTEIRO, 2008).

A terra diatomácea é um dos principais tipos de sílica opalina, e tem em sua composição compostos hidratados de sílica não-cristalina de origem orgânica proveniente da parede celular de organismos aquáticos, como algas microscópicas marinhas (SANTOS, 1992). Segundo Montanheiro (2002), as terras diatomáceas se sobressaem como uma importantíssima pozolana natural.

Exemplo de pozolana artificial são as cinzas volantes, captadas por precipitação eletrostática ou captação mecânica das poeiras que acompanham o fluxo de gases na combustão dos fumos de exaustão em usinas termoelétricas alimentadas por carvão (Maria 2011). Essas são as pozolanas artificiais mais comuns e são formadas por partículas muito finas. Suas propriedades químicas variam de acordo com a composição do carvão e impurezas intrínsecas ao processo. De acordo com Camões (2002), 85% de sua composição química contém cristais de sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3), óxido férrico (Fe_2O_3) e cal (CaO), sendo

este último na forma de compostos cristalinos reativos, justificando a alta reatividade dessas cinzas. Sua utilização como substituto parcial do cimento provoca uma redução na exsudação, auxilia no bombeamento, retarda o início da pega e melhora a trabalhabilidade.

Outro tipo de pozolana é a sílica ativa. A sílica ativa ou microsilica é um produto industrial oriundo das produções da liga de ferro-silício ou silício metálico. Existem vários tipos de sílica ativa, variando características como composição química, cor e distribuição granulométrica. Nos materiais cimentícios, a microsilica pode ser empregada a fim de aumentar a resistência mecânica e a compacidade, devido às reações pozolânicas e do efeito de enchimento que ocorre em virtude da diminuição da porosidade total devido ao preenchimento dos vazios. No concreto fresco, a sílica contribui para a diminuição da segregação e da exsudação, porém se faz necessário o uso de plastificantes e superplastificantes para assegurar uma trabalhabilidade satisfatória da mistura. No concreto endurecido é constatado um aumento na resistência à compressão, diminuição da porosidade e da permeabilidade, e aumento na resistência a agentes corrosivos (MEHTA E MONTEIRO, 2008).

Já as argilas calcinadas são pozolanas cuja transformação de um solo ou folheto argiloso que foi anteriormente processado num material inerte e com resistência mecânica culminam em sua existência. As argilas só mostram alguma reatividade após serem submetidas a um tratamento térmico entre 600° e 1000°C, surtindo mudanças em suas propriedades físicas e químicas, como a transformação na estrutura cristalina dos silicatos que compõem a argila, transformando-a em compostos amorfos capazes de reagir com a cal à temperatura ambiente. Argilas como caulinitas, montmorilonitas e ilitas são minerais bastante utilizados para a produção dessas pozolanas (SOUZA SANTOS, 1992).

Há também a escória granulada de alto-forno. De acordo com a NBR 5735 (ABNT, 1991) define esse material como subproduto do tratamento do minério de ferro em alto forno, obtida em sua forma granulada através do resfriamento brusco, sendo composto majoritariamente por silicatos e aluminatos de cálcio. A escória se forma através da fusão de impurezas contidas no minério de ferro, junto com as adições dos fundentes e as cinzas do coque. A escória que recebe resfriamento lento apresenta-se expandida, com coloração entre cinza escuro e marrom. Caso

seja resfriada rapidamente, se é obtida a escória granulada ou peletizada, um material amorfo e reativo. É com as características descritas aqui por último que a escória é utilizada como adição ou substituição parcial do cimento Portland e na fabricação de cimentos compostos. De acordo com Little (1999), esse tipo de pozolana é capaz de conferir boa durabilidade, alta resistência a meios sulfatados, baixo calor de hidratação e maior ganho de resistência em longo prazo.

A cinza da casca de arroz é um resíduo resultante do beneficiamento do arroz seguido de combustão da sua casca. Esse processo é utilizado pelas indústrias para gerar calor e vapor necessários ao processo de secagem e parboilização dos grãos. Com isso, é produzido grande quantidade de cinzas, consequentemente, de resíduos. Santos (2006) afirma que a cinza da casca de arroz é o resíduo agroindustrial em maior volume de material disposto na natureza. Esse material apresenta grande quantidade de sílica, geralmente na forma amorfa e hidratada com uma estrutura similar a um estado parecido ao vítreo ou gel, algo na faixa de 85 a 95% da sua constituição. Além do processo de combustão, a sílica deve ser obtida através de tratamentos físico-químicos da casca, seguidos de queima e processos microbiológicos (POUEY, 2006 apud NETTO, 2006). As cinzas podem apresentar-se em diversas colorações, de acordo com a composição e com seu processo de obtenção. A cinza mais escura possui maior teor de carbono, sendo constituída por grande quantidade de matéria orgânica não queimada. A coloração mais clara da cinza implica numa oxidação completa do carbono da cinza. Caso ela esteja com um aspecto rosado, é indicação de que existe sílica na forma de cristobalita e tridimita. Essa pozolana possui área superficial elevada e baixa granulometria, sendo considerada uma superpozolana (NETTO, 2006).

Outra cinza já utilizada como pozolana é a de casca de castanha de caju, a qual é obtida durante o processo de decorticação, que separa a casca da castanha. A cinza é obtida durante o processo de queima da casca visando gerar calor nas caldeiras de decorticação (LIMA et al., 2008). Poucas pesquisas foram realizadas com essa cinza, porém a mesma apresenta grande potencialidade devido à sua semelhança com pozolanas já bastante estudadas e devido também à grande quantidade de sílica presente (CINCOTTO e KAUPATEZ (1988) apud LIMA (2008)).

Na Tabela 4 constam os resultados coletados ao longo da revisão da literatura de materiais com potencial pozolânico provenientes de resíduos vegetais.

E na Tabela 5 os resultados comparativos de resistência à compressão quando utilizado sílica flour (SF), cinza do bagaço de cana (CBC), metacaulim (MK) e cinza da casca de arroz (RC) em duas temperaturas de cura distintas em contraste com os resultados da pasta de referência (PR).

Tabela 4. Resultados coletados dos materiais pozolânicos provenientes de resíduos vegetais.

Autor	Pozolana	Composição adotada	Condições de cura	Resistência à compressão
ANJOS, M.A.S	Bagaço de cana-de-açúcar	59 wt.%	14d-38°C+7d-280°C/100psi	33,89 MPa
SANTIAGO, R.C	Casca de arroz	30 wt.%	28d-280°C/2000psi	16,07 MPa
MARIA, S.P	Folha de bananeira	30 wt.%	28d-T _{amb} /P _{amb}	28 MPa
KANNING, R.C.	Folha de bananeira	7,5 wt.%	-	36 MPa

Tabela 5. Resultados de resistência à compressão de pastas de cimento com adição de sílica flour (SF), cinza do bagaço de cana (CBC), metacaulim (MK) e cinza da casca de arroz (RC) em comparativo à pasta de referência (PR).

Cura	Resistência (MPa)							
	PR	SF	CBC20	CBC40	MK20	MK40	RC20	RC40
38°C	28,6	31,5	28,1	31,9	33,8	30,3	33,66	38,87
280°C	12,26	17,3	6,4	19,7	18,0	22,3	6,84	5,06

De acordo com os resultados expostos nas tabelas acima, pode-se observar que o desempenho de pastas de cimento reforçadas com cinza da folha de bananeira são bastante relevantes, visto que sua resistência à compressão chega a ser superior a daquela expressa pela PR a 38°C e a reforçada com SF, isso indica

um extenso potencial latente, já que não foi devidamente explorado na cimentação de poço de petróleo e há poucos indícios dessa linha de pesquisa, justificando, portanto, o interesse e a motivação do presente trabalho, para que, desta maneira, possa-se expandir o conhecimento da atividade pozolânica da cinza da folha de bananeira para aplicações estruturais e, principalmente, neste caso, cimentação de poços de petróleo.

3.6 Cinza da folha de Bananeira

Numa tentativa de expandir o conhecimento acerca desse universo das pozolanas, estudos sobre o uso da cinza da folha de bananeira foram realizados a fim de auxiliar na elaboração da pasta de cimento para poços de petróleo. A bananeira é uma planta típica de regiões tropicais e subtropicais, agregando alto valor em termos econômicos e sociais, visto que é tida como fonte de renda e alimento para milhões de pessoas. Depois da laranja, a fruta mais cultivada no Brasil é a banana, podendo ser consumida verde ou madura, crua ou processada.

De acordo com a FAO (2010), em 2008 o Brasil ocupou a quarta colocação na pesquisa envolvendo os principais produtores mundiais de banana, destacando-se com a produção de 7,1 milhões de toneladas em aproximadamente 514 mil alqueires.

Por ser uma fruta de clima tropical, a bananeira tende a desenvolver-se em temperaturas com média anual na ordem de 22°C com precipitações pluviométricas superiores a 1200 mm/ano.

As variações na altitude da região influenciam demasiadamente no desenvolvimento da bananeira. Por exemplo, quando é cultivada a cerca de 300 m acima do nível do mar, o ciclo de produção é otimizado, sendo considerado seu ponto de máxima produção, ocorrendo entre 8 a 10 meses, enquanto que para altitudes próximas à 900 m acima do nível do mar, são necessários 18 meses para obter a fruta (CORDEIRO, 2009 apud KANNING, 2014).

Kanning (2010) relata que cada pé de banana, em sua vida útil, produz cerca de 1343g de folhas secas. Em 2012, estimou-se que cerca de 900 milhões de toneladas anuais de folha seca foram produzidas.

Para que as bananeiras e seus brotos se desenvolvam de maneira saudável, é de vital importância o processo de limpeza das folhas secas, por essas folhas se dobram junto ao pseudocaule, dificultando o crescimento das brotações. É através da sua eliminação que novas gemas laterais de brotação surgem.

Kanning (2010) também avaliou o índice de atividade pozolânica da cinza da folha de bananeira. Seus resultados foram bastante satisfatórios, evidenciando que a cinza apresenta atividade pozolânica superior aos valores mínimos indicados nas normas NBR 5751 (ABNT, 1992) e 5752 (ABNT, 1992), quando são queimadas com temperaturas de 850°C e moídas num moinho de bolas com tempo ideal de 30 min.

4 CONCLUSÃO

Após toda a ponderação acerca dos dados coletados, percebe-se a necessidade clara da indústria petrolífera de desenvolver novos materiais capazes de desempenhar um papel suficientemente satisfatório que possibilite a exploração das jazidas em ambientes bastante extremos.

A partir disso, foi desenvolvida uma discussão cujo enfoque ficou detido aos tipos de materiais pozolânicos já existentes, estudados e aplicados. Desta maneira, pôde-se observar a ausência de estudos de materiais pozolânicos provenientes da cinza da casca da folha de bananeira para aplicações em cimentação de poços de petróleo.

Com base nessa lacuna, o estudo foi realizado com sucesso, coletando dados e comparando-os a fim de perceber a capacidade latente da cinza da folha de bananeira.

Como foi dito anteriormente, a resistência à compressão da cinza apresentou, para cimentos estruturais, resultados de resistência à compressão superior às dos demais materiais pozolânicos, provocando o surgimento da necessidade de teste do seu desempenho quando torna-se componente de uma pasta de cimento para poços de petróleo, submetendo essas amostras às condições ambientais a que irão enfrentar.

5 PERSPECTIVAS PARA TRABALHOS FUTUROS

De acordo com resultados de Kanning, a cinza da folha de bananeira poderá ser utilizada para formulações de pastas de cimento para poços de petróleo, visto que apresentou excelente desempenho. Portanto, faz-se necessário um estudo experimental aprofundado, visando averiguar a eficácia ou ineficácia do material pozolânico em reagir com a cal livre e formar CSH, ou seja, aferir seu índice de atividade pozolânica.

O presente trabalho é guia e apoio para trabalhos futuros. Nele evidencia-se a necessidade do estudo da influência da granulometria da cinza de bananeira, variando para isso o tempo de moagem. Além disso, é de grande utilidade estabelecer uma comparação de desempenho do cimento aditivado com diferentes tipos de materiais pozolânicos, a fim de tomar conhecimento da efetividade e do comportamento de cada aditivo de acordo com as condições desejadas na aplicação.

REFERÊNCIAS

ABANORTE. Disponível em:
<<http://www.abanorte.com.br/producao/abanorte/fruticultura/banana>> Acesso em 20 de fevereiro de 2018.

ANJOS, M. A. S. Adição do resíduo de biomassa da cama de açúcar em pastas para cimentação de poços petrolíferos produtores de óleos pesados. 2009. **Tese de Doutorado (Engenharia de Materiais)**. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

BACKE, K. R.; LILE, O. B.; LYOMOV, S. K.; ELVEBAKK, H.; SKALLE, P. Characterizing Curing-Cement Slurries by permeability, Tensile Strength, and Shrinkage. **SPE Drill. & Completion**, v. 14 no 3, 1999.

BARROSO, M.D.B. Desenvolvimento de Compósitos com Matriz de Geopolímeros reforçados com Partículas de Quasicristais AlCuFe. **Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica**. Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2009.

BENSTED, J. A. Simple retarder response test for oil well cements at high temperatures, **Cement and Concrete Research**, v. 23, p. 1245, 1993.

BEZERRA, U. T. Compósitos Portland-biopolímero para cimentação de poços de petróleo. Natal: **Tese (doutorado)** PPGCEM/UFRN, 2006.

BLACK, L.; GARBEV, K.; STEMMERMANN, P.; HALLAM, K. R. and ALLEN, G. C. "Characterisation of crystalline C-S-H phases by X-ray photoelectron spectroscopy." **Cement and Concrete Research** **33**, 2003: 899-911.

BOTELHO, M. H. C.; MARCHETTI, O. Concreto armado eu te amo. **Volume 1, 8ª Edição**. Editora Blucher, 2015.

CAMÕES, A. F. F. L. Betões de elevado desempenho com incorporação de cinzas volantes. **Tese de doutorado em Engenharia Civil** – Universidade do Minho – Minho, Portugal, 2002.

CEAGESP. Disponível em:
<http://www.ceagesp.gov.br/produtor/estudos/artigos/artigo_070410> Acesso em: 20 de fevereiro de 2018.

CINCOTTO, M. A.; SILVA, M. A. C.; CASCUDO, H. C. Argamassas de revestimento: características, propriedades e métodos de teste. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1995. **Boletim Técnico n. 68.**

CINCOTTO, M. A.; KAUPATEZ, R. M. Z. Seleção de materiais quanto a atividade pozolânica. **Tecnologia das Edificações.** São Paulo: 1988. IPT-PINI.

CORDEIRO, G. C. Utilização de cinzas ultrafinas do bagaço de cana-de-açúcar e da casca de arroz como aditivos minerais em concreto. **Tese de doutorado.** Programa de pós-graduação de engenharia. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2006. 445 pg.

CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIRN, E. M. R. Caracterizacao de cinza do bagaco de cana-de-acucar para emprego como pozolana em materiais cimenticios. **Quim Nova** 2009; 32:82.

CORDEIRO, G. C.; TOLERO FILHO, R. D.; TABARES, L. M; FAIRBAIRN, E. de M. R. Ultrafine griding of sugar cane bagasse ash for application as pozzolanic admixture in concreto. **Cemento and Concrete Research** 39, 2009. p 110 – 115.

COSTA, J. Cimentação de Poços de Petróleo. Universidade Estadual do Rio Grande do Norte Fluminense, Centro de ciências da tecnologia, Macaé, 2004.

COUTINHO, J. S. **Materiais de construção 2.** Parte 1 – ligantes e caldas. Porto: Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, 2002.

FAO. Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação. Disponível em: <http://www.fao.org.br/>.

GAVA, G. P. Estudo comparativo de diferentes metodologias para avaliação da atividade pozolânica. 1999. **Dissertação de Mestrado (Engenharia Civil)**. Universidade Federal de Santa Catarina.

GOTHENBURG, S. Phase quantification and microstructure of a clinker series with lime saturation factors in the range of 100, **10th International congress on the chemistry of cement**, p. 287-294, 1997.

HALLIBURTON COMPANY, Cimentação (**apostila**), Mossoró, RN. p.120. 1998.

HIBBELER, J.; ERA, P.; GILMORE, T.; WEBBER, L. Using alternative sources of oilwell cement, IADC/SPE 62746. In: **IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology** held in Kuala Lumpur, Malaysia, 2000.

JAWED, I.; SKALNY, J.; YOUNG, J. F. Hydratation of Portland Cement. In: BARNES, P. (Ed.). **Structure and Performance of Cement**. Essex: Applied Science Publishers, 1983. P. 237-318.

KACIMI, L.; SIMON-MASSERON, A.; SALEM, S.; GHOMARI, A.; DERRICHE, Z. Synthesis of belite cement clinker of high hydraulic reactivity. **Cement and Concrete Research**, 2009, p. 559-565.

KANNING, R. C. Avaliação do potencial pozolânico da cinza de folha de bananeira. **Dissertação de Mestrado**. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2010. 69p.

KANNING, R. C. et al. Banana leaves ashes as pozzolan for concrete and mortar of Portland cement. **Construction and Building Materials**, 2014, p. 460-465.

LIMA, F. M. Avaliação do comportamento reológico de pastas de cimento para poços de petróleo com adição de plastificantes. **Dissertação de Mestrado (Engenharia de Materiais)**. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 2007.

LITTLE, A. D. et al. Estudo sobre as aplicações das escórias siderúrgicas. **Preparado para: Instituto Brasileiro de Siderurgia – IBS e Empresas Siderúrgicas Associadas**. 1999.

MAURY, M. B.; BLUMENSCHN, R. N. Produção de cimento: Impactos à saúde e ao meio ambiente. **Sustentabilidade em Debate**, 2012.

MARIA, S. P. Estudo da adição de cinza de folha de bananeira em argamassas. 2011. **Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnologia do Concreto)**. Universidade Tecnológica do Paraná.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**, IBRACON 2008.

MELO, C. G. M. B. Influência da adição do NaCl e KCl em sistemas de pastas contendo sílica para poços de petróleo em zonas evaporárias e carbonáticas. 2012. **Tese de Doutorado (Ciência e Engenharia de Materiais)**. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

MENEZES, R. R. et al. Atividade pozolânica dos resíduos do beneficiamento do caulim para uso em argamassas para alvenaria. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 2009, p. 795-801.

MONTANHEIRO, T. J.; YAMAMOTO, J. K.; KIHARA, Y. Proposta de pré-qualificação pozolânica de materiais geológicos: difratometria de raios X como método alternativo. **Revista do Instituto Geológico**, 2003: 1-9.

NASCIMENTO, J. H. O. Adição de Poliuretana não iônica a cimento Portland especial para Cimentação de Poços de Petróleo. 2006. **Dissertação de Mestrado (Engenharia de Materiais)**. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

NELSON, E. B. Well cementing, Saint-Etienne: Schlumberger Educational Services, 1990.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**, 2ª Edição, Editora PINI Ltda. São Paulo, 1997.

PELIPENKO, S.; FRIGAARD, I. A. Mud removal and cement placement during primary cementing of an oil well. **Journal of Engineering Mathematics**, v. 48, p. 1-26, 2004.

POUEY, M. T. F. Beneficiamento da cinza de casca de arroz residual com vistas à produção de cimento composto e/ou pozolânico. **Tese de doutorado**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Porto Alegre – RS, 2006.

ROCHA, L. A. S.; AZEVEDO, C. T. Projeto de poços de petróleo: geopressões e assentamento de colunas de revestimentos. Rio de Janeiro, Petrobras, 2007.

SANTOS, J. B. F. Modificações morfológicas e estruturais de pastas de cimento aditivadas com termofixos a base de epóxi para utilização em poços de petróleo. 2006. **Dissertação (Mestrado em Física)**, Universidade Federal de Sergipe, Sergipe.

SANTIAGO, R. C. Influência da sílica natural proveniente da casca de arroz em pastas de cimento para cimentação de poços de petróleo submetidos à injeção de vapor. 2014. **Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais)**, Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN.

SAVASTANO Jr, Holmer. **Materiais à base de cimento reforçados com fibra vegetal: reciclagem de resíduos para construção de baixo custo.** USP - Escola Politécnica, 2000 - Tese de Livre Docência.

SILVA, D.; AGUIAR, M. B. A utilização da casca de banana como substituição de parte do cimento na produção de tijolos ecológicos: a busca por alternativas sustentáveis. 2017. **Percorso Acadêmico.** Pontífice Universidade Católica de Minas Gerais.

SNIC. **Sindicato Nacional da Indústria do Cimento.** Disponível em: <<http://www.snic.org.br/>> Acessado em 20 de fevereiro de 2018.

SOUZA, P. S. L. Verificação da influência do uso do metacaulim de alta reatividade nas propriedades mecânicas do concreto de alta resistência. Porto Alegre. **Tese de doutorado.** Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS, 2003. 203p.

TAYLOR, H. F. W. Cement Chemistry. London: Academic Press, 1998.

THOMAS, J. E. **Fundamentos de engenharia de petróleo.** RJ – 2001.